

# Тестування контролера знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї

Ігнатушенко О. Я.

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

**Анотація**—Розглядається проектування та побудова контролера знаходження точки максимальної потужності (ТМП) сонячної батареї та його тестування для різних значень освітленості. Виходячи з можливих схемотехнічних рішень та існуючих програмних алгоритмів роботи контролера знаходження ТМП, була вибрана схема two-switch buck-boost перетворювача та алгоритм «збурення та спостереження». Побудовано друковану плату системи, розрахованої на потужність сонячної батареї до 60 Вт з підключеним акумулятором та споживачем напругою до 30 В. Було перевірено працездатність системи та проемьюльовано різні варіанти роботи системи для різних умов освітленості.

**Ключові слова** — система слідування за точкою максимуму потужності; two-switch buck-boost converter; метод збурення та спостереження.

## I. ВСТУП

Використання контролерів знаходження точки максимальної потужності (ТМП) зумовлене особливістю сонячних батарей (СБ), що використовуються як джерело сонячної енергії [1]. В деяких випадках СБ можна безпосередньо підключати до споживача, однак треба враховувати необхідність забезпечення певних параметрів напруги споживача, що неможливо через нелінійну криву навантаження СБ та залежність від рівня освітленості та температури. Тому між СБ та споживачем встановлюють перетворювач, що може змінювати рівень електричної напруги та її форму [2]. Основним методом збільшення ефективності перетворювача є знаходження ТМП, яка може постійно зміщуватись [3]. Дуже важливо при використанні СБ забезпечувати положення робочої точки в околі ТМП, що значно збільшує вихідну ефективність СБ [4]. Для знаходження цієї точки застосовуються різні алгоритми, які використовують окремі параметри СБ, зокрема миттєві значення струму та напруги на виході СБ, її температуру тощо [5].

Контролери знаходження ТМП можуть використовуватися для живлення на постійній чи змінній напрузі, в залежності від потреб споживача. Основною частиною контролерів знаходження ТМП є DC-DC перетворювач з використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що дає можливість відбирати максимальну потужність з СБ, що передається до споживача [2].

В даній статті розглядається побудова контролера знаходження ТМП СБ, який має працювати в заданому діапазоні струму та напруги. Враховуючи структуру системи та необхідні параметри роботи, для його побудови необхідно брати до уваги різні схемотехнічні рішення для силової частини, а також

методики знаходження точки максимальної потужності для схеми керування [5], [6].

Отримавши таку систему, наступним постає задача перевірки загальної працездатності у заданому діапазоні змін струму та напруги, а також спроможність реагувати на зміни значень струму і напруги та зовнішніх умов, що безпосередньо впливають на роботу СБ.

Тому, метою роботи є експериментальна перевірка роботи системи знаходження ТМП при зміні освітленості і споживача.

## II. ПОРЯДОК ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ

Основним принципом роботи системи є передача сонячної енергії від СБ через DC-DC перетворювач до споживача. Така система також містить давачі струму та напруги на виході СБ; виміри з давачів потрапляють до мікроконтролера, де розраховується миттєве значення потужності і в залежності від цього, приймається рішення про зміну керуючих сигналів, що прямують через драйвери до транзисторів DC-DC перетворювача.

На основі приведенного опису була побудована структурна схема, яка представлена на Рис. 1. На зображеній структурній схемі представлені складові частини контролера знаходження ТМП, а також під'єднані до контролера СБ, споживач та акумулятор. Акумулятор відбирає енергію, яка не використалася споживачем та віддає – при недостатніх значеннях енергії на виході СБ. Також від акумулятора енергія передається до блоку живлення, що представляє собою понижуючий DC-DC перетворювач та використовується для живлення системи керування: мікроконтролера, драйвера та індикації. Індикація у свою чергу необхідна для відображення корисної



інформації, як наприклад значення напруги на СБ та іншу інформацію, що може бути корисною для відлагодження та налаштування системи. На даному етапі індикація представлятиме собою невеликий дисплей, але у подальшому можна розширювати кількість індикацій роботи для зручності та гнучкості користування системою.

Для реалізації силової частини (DC-DC перетворювач) була вибрана схема Two-Switch Buck-Boost (див. Рис. 2), перевагою якої є наявність понижуючого (через керування ключем S1) та підвищуючого (керування S2) режиму роботи, а також відсутність інверсії напруги на виході, як у схемі звичайного buck-boost перетворювача, та менша навантаженість на транзистори і діоди, як у схемі SEPIC [7]. Також перевагою вибраної схеми є розміщення ключа на вході схеми, через що у схемі можна вимірювати напругу холостого ходу, а отже використовувати цю напругу для знаходження ТМП, у такий спосіб збільшивши можливу кількість методів пошуку ТМП.

Для тестування системи необхідно емулювати сонячну батарею. Використання реальних СБ потребують спеціального обладнання для вимірювання температури та спеціальних погодних умов, які б могли забезпечити зміну саме розглянутих параметрів, через що для тестування використовується лінійна апроксимація ділянки в околі ТМП вольт-амперної характеристики (ВАХ) СБ при різних значеннях освітленості.

В загальному випадку сонячну батарею представляють як ідеальне джерело струму з паралельно під'єднаними діодом та шунтом, а також послідовним резистором (див. Рис. 3) [8], [9].

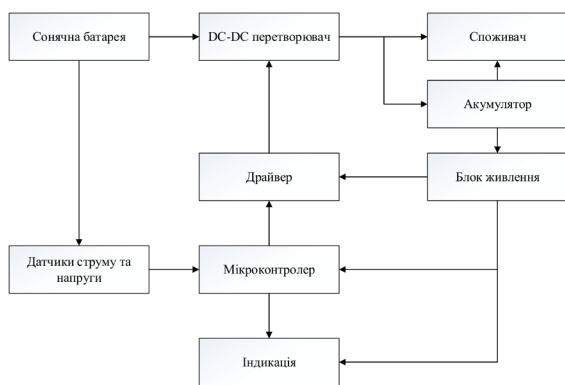


Рис. 1 Структурна схема

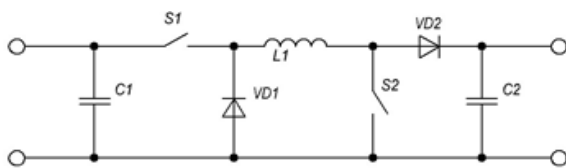


Рис. 2 Схема two-switch buck-boost перетворювача

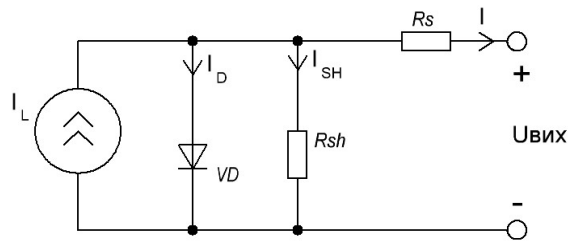


Рис. 3 Еквівалентна схема сонячної батареї

З приведеної еквівалентної схеми можна вивести таке рівняння:

$$I = I_L - I_D - I_{SH}, \quad (1)$$

де  $I$  – вихідний струм батареї;  $I_L$  – фотозгенерований струм;  $I_D$  – струм діода;  $I_{SH}$  – струм шунта.

Струм діода визначається наступною формулою [9]:

$$I_D = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{U + I \cdot R_S}{nV_T}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

де  $I_0$  – зворотній струм насичення діода;  $U$  – вихідна напруга сонячної батареї;  $R_S$  – опір послідовного резистору;  $n$  – коефіцієнт ідеальності діода (дорівнює приблизно 1,4);  $V_T$  – теплова напруга (при 25 °C  $V_T \approx 0,0259$  В).

А струм шунта дорівнює [9]:

$$I_{SH} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_{SH}}, \quad (3)$$

де  $R_{SH}$  – опір шунту.

Підставивши рівняння (2) і (3) у рівняння (1), можна вивести:

$$I = I_L - \left[ I_0 \cdot \exp\left(\frac{U + I \cdot R_S}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_S}{R_{SH}} \quad (4)$$

Рівняння (4) можна використовувати для побудови апроксимованих навантажувальних кривих. У наступному розділі визначаються значення параметрів рівняння та будуються ВАХ.

Для вирішення поставлених задач необхідно побудувати експериментальну установку та розробити метод перевірки роботи при різних можливих параметрах роботи СБ.

### III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виходячи з описаних завдань, було розроблено та побудовано друковану плату системи знаходження ТМП (див. Рис. 4), яка готова для під'єднання до сонячної батареї та споживача. Дана плата виконана за допомогою з'єднання декількох модулів, завдяки чому можна замінити чи додавати окремі елементи та відлагоджувати систему, що зручно на етапі розробки та тестування.

Основні елементи, що використовуються у системі: транзистор MOSFET n-типу – IRF7341;

мікроконтролер – STM32F103C8; понижуючий DC-DC – LM2596; модуль драйвера для MOSFET, побудований на базі 1EDI20I12MF та STM8S003F3P з гальванічною розв'язкою.

Елементи DC-DC перетворювача вибиралися відповідно до робочих значень напруги і струму на відповідних елементах та частоти їх роботи. При цьому робочі значення елементів відрізняються у підвищувочому та понижуючому режимах, що також необхідно враховувати при виборі елементів. Вибраний мікроконтролер відрізняється швидкістю, доступністю та універсальністю, що дозволяє використовувати його для передачі сигналу до дисплею, керуванню DC-DC перетворювачем та прийманню сигналів з усіх датчиків, при цьому мікроконтролер має вільні виводи та інтерфейси передачі даних, що також плануються використовувати для розширення функціоналу системи модулями, зокрема для дистанційного індикації стану системи.

Побудована система розрахована на напругу сонячної батареї до 30 В та струму до 2 А.

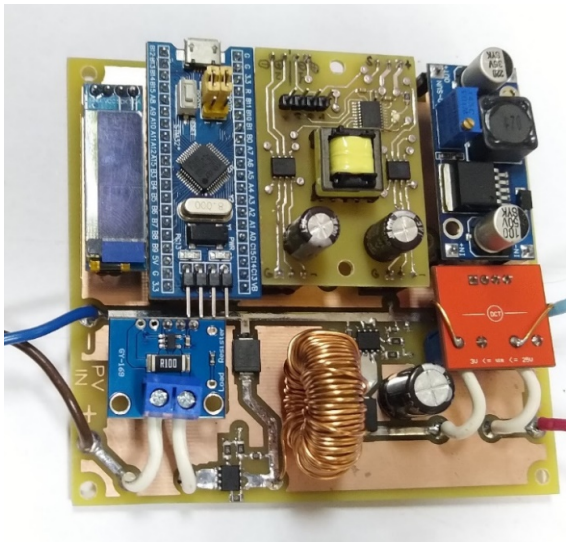


Рис. 4 Фото зібраної системи

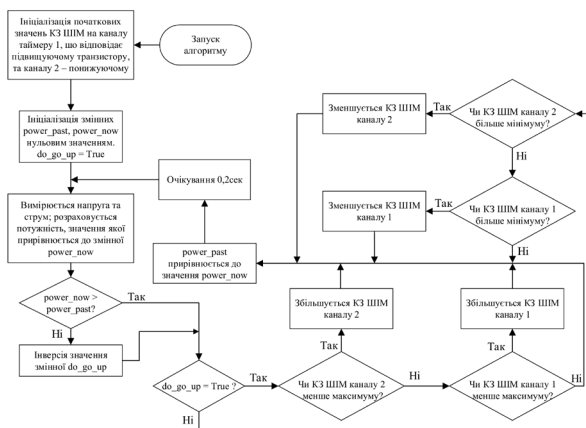


Рис. 5 Алгоритм роботи мікроконтролера

Для роботи зібраної системи необхідно задати алгоритм роботи системи керування, за основу якого був взятий метод «збурення та спостереження» [5]. В загальному алгоритм роботи мікроконтролера представлений на Рис. 5, де керування DC-DC перетворювачем відбувається за допомогою зміни коефіцієнту заповнення (КЗ) ШІМ керуючої напруги, що подається на затвор транзисторів. Мінімальні та максимальні значення КЗ додатково обраховуються для забезпечення безпечної роботи системи. Метод має деякі модифікації через наявність можливості роботи як у підвищувочому так і понижуючому режимах вибраного DC-DC перетворювача.

Через особливості структури DC-DC перетворювача система керується двома коефіцієнтами заповнення: один – для ключа S1 (Рис. 2), який керує понижуючим режимом роботи, а при підвищувочому завжди дорівнює 100%; другий – для ключа S2, який керує підвищувочим режимом, та дорівнює 0% при понижуючому. Для зручності, в зображеному алгоритмі ці коефіцієнти об'єднані в один, через те, що при досягненні 100% коефіцієнту заповнення ключа S1, цей коефіцієнт залишається 100% і починається збільшуватись коефіцієнт ключа S2, та навпаки.

Для емуляції роботи СБ та зміни освітленості аналітично було побудовано ВАХ СБ при різних рівнях освітленості.

Використовуючи рівняння (4) та підставивши типові значення коефіцієнтів:  $\eta$ ,  $V_T$ , та підбравши такі значення величин:  $I_0 = 1 \cdot 10^{-9}$  А,  $R_S = 1 \cdot 10^{-3}$  Ом,  $R_{SH} = 1,65$  Ом,  $I_L = 0,8 \dots 1,5$  А, для побудови близької до реальної ВАХ. Отримавши рівняння ВАХ, можна змінювати значення фотозгенерованого струму  $I_L$ , що відповідає зміні освітленості. На Рис. 6 зображені криві навантаження СБ та прями, що лінійно апроксимують криві у околі точки максимальної потужності (I-III).

Отримавши аналітичні рівняння прямих, можна знайти необхідні значення для відтворення цих прямих за допомогою зовнішнього джерела живлення з регульованою напругою та резистора, з'єднаних послідовно та підключених до входу системи замість СБ. Отже, пряма I відповідає значенню напруги джерела живлення 14,1 В та послідовного опору (RS) 6,76 Ом; пряма II відповідно – 13,7 В та 9 Ом; пряма III – 12,4 В та 14,7 Ом.

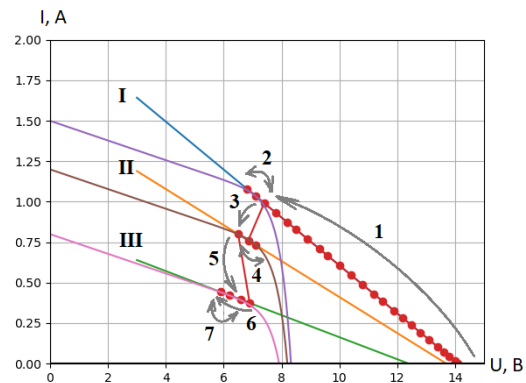


Рис. 6 Навантажувальні криві та ілюстрація роботи



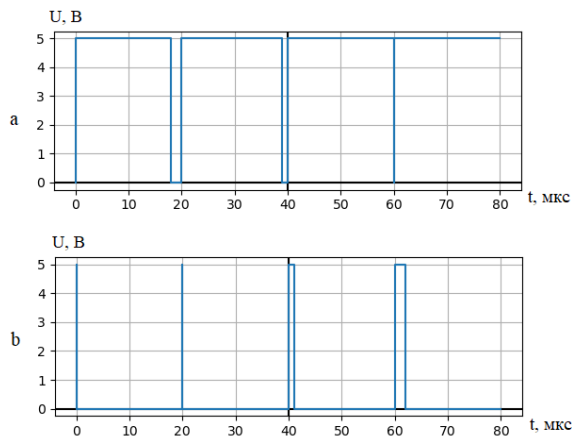


Рис. 7 Часові діаграми системи в момент переходу режимів

Розглянемо роботу системи з вхідною енергією, для якої діапазон значень напруги та струму визначається зображеною на Рис. 6 вольт-амперною характеристикою прямих I-III. Система починаючи з точки холостого ходу прямої I: відповідно до алгоритму, напруга та струм поступово наближаються до точки максимальної потужності, напрямком позначено стрілкою 1; перейшовши цю точку, контролер постійно збільшує чи зменшує значення коефіцієнту заповнення DC-DC перетворювача (стрілка 2), таким чином знаходячись у околі шуканої точки та віддаляючись від неї на один крок; після переходу у режим навантажувальних прямої II за допомогою перемикання напруги та зміни опору, тобто імітуючи зменшення освітленості, робоча точка різко зміщується (стрілка 3), при цьому потужність зменшується, тому контролер змінює напрям зміни коефіцієнту заповнення, після чого повторюється пошук точки та коливання біля її околу (стрілка 4), цей процес повторюється і при переході на пряму III (стрілки 5-7).

На Рис. 7 наведені часові діаграми керуючої напруги, що подається на транзистори під час переходу перетворювача з понижуючого до підвищуючого режиму роботи. Коефіцієнт заповнення першого транзистора (S1 на Рис. 2) досягає максимуму на 40 мкс (див. Рис. 7а), при цьому в цей же момент другий транзистор (S2 на Рис. 2) починає відкриватися, а коефіцієнт заповнення стає більшим нуля (Рис. 7б).

### ВИСНОВКИ

Таким чином, у роботі було побудовано структурну схему системи знаходження ТМП та відповідно неї вибрано схему силової частини і системи керування, а також необхідні допоміжні елементи системи. Розроблена та побудована друкована плата пропонованої системи, в якій були приєднані всі вибрані елементи системи. Розглянуто вплив освітленості на зміну робочих параметрів системи та протестовано роботу системи у заданому діапазоні напруги.

Надійшла до редакції 13 квітня 2020 року

Продемонстровані часові діаграми переходу керуючої напруги системи з понижуючого у підвищуючий режим роботи DC-DC перетворювача.

Розроблена система відрізняється простотою, модульністю та гнучкістю налаштування, а також, за рахунок вибраного DC-DC перетворювача, можливістю роботи у понижуючому і підвищуючому режимах та потенційним використанням декількох методів знаходження ТМП. А отже система має переваги у використанні та дослідженні різних вхідних та вихідних пристроїв, а також модифікації системи керування, для дослідження чи доповнення функціоналу системи.

Після виконаної роботи відкриваються перспективи вдосконалення, а також випробування системи, використовуючи різні СБ та споживачі при різних погодних умовах. При цьому планується використання додаткових модулів з безпроводними технологіями для дистанційної індикації [10], що можливо виконати завдяки модульності системи та функціоналу вибраного МК.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Wikipedia Contributors, "Maximum power point tracking," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2020, URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum\\_power\\_point\\_tracking&oldid=943845013](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum_power_point_tracking&oldid=943845013).
- [2] Weidong Xiao, *Photovoltaic Power System*. John Wiley & Sons Ltd., 2017, ISBN: 9781119280361.
- [3] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 2392–2396, DOI: [10.1109/ISIE.2007.4374981](https://doi.org/10.1109/ISIE.2007.4374981).
- [4] J.-M. Kwon, K.-H. Nam, and B.-H. Kwon, "Photovoltaic Power Conditioning System With Line Connection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1048–1054, Jun. 2006, DOI: [10.1109/TIE.2006.878329](https://doi.org/10.1109/TIE.2006.878329).
- [5] R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008, URL: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/power/2008/27-545.pdf>.
- [6] B. K. Bose, P. M. Szczesny, and R. L. Steigerwald, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 5, pp. 1182–1191, Sep. 1985, DOI: [10.1109/TIA.1985.349522](https://doi.org/10.1109/TIA.1985.349522).
- [7] Haifeng Fan, "Design tips for an efficient non-inverting buck-boost converter," *TI Analog Appl. J.*, vol. 3Q, pp. 20–25, 2014, URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt584/slyt584.pdf>.
- [8] M. A. G. de Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. de A. e Melo, and C. A. Canesin, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, Mar. 2013, DOI: [10.1109/TIE.2012.2198036](https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2198036).
- [9] Wikipedia Contributors, "Theory of solar cells," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2020, URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Theory\\_of\\_solar\\_cells&oldid=944258832](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Theory_of_solar_cells&oldid=944258832).
- [10] Y. Wenbo, W. Quanyu, and G. Zhenwei, "Smart home implementation based on Internet and WiFi technology," in *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, 2015, pp. 9072–9077, DOI: [10.1109/ChiCC.2015.7261075](https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7261075).



# Testing Maximum Power Point Tracking Controller for PV System

O. Ya. Ihnatushenko

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—Recently, the demand for renewable energy sources, in particular solar, has been increasing. This is due to declining demand for other fuels due to the poor reputation, waste of nuclear energy and limited fossil resources such as coal. The growing popularity of silicon significantly reduces the cost and increases the availability of solar energy. The main technique of increasing efficiency of the converter is to find maximum power point tracking (MPPT) that addressing problem of efficiency of power transfer from the solar cell depends on both the amount of sunlight falling on the solar panels and the electrical characteristics of the load. As the amount of sunlight varies, the load characteristic that gives the highest power transfer efficiency changes, so that the efficiency of the system is optimized when the load characteristic changes to keep the power transfer at highest efficiency. This load characteristic is called the maximum power point and MPPT is the process of finding this point and keeping the load characteristic there. Electrical circuits can be designed to present arbitrary loads to the photovoltaic cells and then convert the voltage, current, or frequency to suit other devices or systems, and MPPT solves the problem of choosing the best load to be presented to the cells in order to get the most usable power out.

This article considers the construction of MPPT controller of solar panel, which must operate at up to 60W power of solar panel and up to 30V of output battery voltage. Given the structure of the system and the necessary operating parameters, for its construction it is necessary to take into account various circuit solutions for the power unit, as well as methods for finding the point of maximum power for the control circuit.

The design and construction of the MPPT controller of the photovoltaic system and testing for different irradiation values is considered. Various circuit design solutions and algorithms for the operation of the MPPT controller were analyzed and a two-switch buck-boost circuit and a perturb and observe algorithm were selected. After making the system task is at general checking of possible operating in a given range of current and voltage, as well as the ability to respond to changes in current and voltage values and some external conditions that directly affect the work of a solar panel. The algorithm of work, formulas for emulation and an example of system work were given. The algorithm of work, formulas for emulation and an example of system work were given. The time diagrams of the control signals of the transistors at the time of switching from buck mode to boost mode are shown. A step-by-step description of the changes that occur in the system during the change of parameters and how the feedback stabilizes the operation of the device to maintain the maximum power of the system.

After the developed experiment, the workability of the layout was checked and various variants of operation of the device for different lighting conditions were simulated. A conclusion was drawn on the potential for further development of the proposed solution. The circuit used operates at a given power and the proposed idea has the potential for further development and experimenting.

**Keywords** — *maximum power point tracking system; two-switch buck-boost converter; perturb and observe method.*

